干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

新疆南疆地区太阳能资源时空分布特征及区划研究

顾　玮[1,2]，　古丽·加帕尔[1,3,4]，　尹瀚民[1,4]，　姜亮亮[1,4]，　藏晓芳[1,5]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐　830011；2. 新疆维吾尔自治区农业资源区划和遥感应用中心，新疆 乌鲁木齐　830002；3. 中国科学院中亚生态与环境研究中心，新疆 乌鲁木齐　830011；4. 中国科学院大学，北京　100049；5. 新疆环境保护科学研究院，新疆 乌鲁木齐　830000）

摘　要：研究基于1980—2015年中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集（ITPCAS）和30个气象观测站点逐月日照资料，运用趋势分析、重标极差分析、小波分析及光热资源评价指标评估方法，对1980—2015年新疆南疆地区太阳总辐射时空分布变化规律与太阳能资源做出分析评价；并结合风沙天气频次、人口丰富度、陆路交通可达性等因素构建区域太阳能资源区划分级指标体系，探索南疆地区太阳能资源利用区划。结果表明：新疆南疆地区太阳总辐射有明显的年际变化特征，总体呈现增长趋势，且每10~15 a出现一次波动。太阳能资源南多北少，同纬度相比山区多、平原少；其中，昆仑山系一带太阳能资源最丰富且较稳定。将全区太阳能资源分为3个区：阿克苏、喀什、和田等地区太阳能资源丰富，利用价值较高且沙尘天气相对较少，为Ⅰ级可利用区，是光电与光生物质能综合利用的最佳区域；塔里木盆地及边缘地带，沙尘天气多且陆路交通可达性一般，为Ⅱ级可利用区，可在该区域推广应用农业温室、太阳能采暖等；若羌地区为Ⅲ级可利用区，该区受沙尘天气影响较大且人口、基础交通设施条件较差，可大力推进分布式光伏电站和独立微网建设。

关 键 词：太阳能资源；时空分布特征；区划研究；新疆南疆地区

文章编号：

近年来，随着能源危机和环境污染问题的日益加剧，能源需求量的不断上升，越来越多的国家开始加强对可再生能源的开发利用。而在我国，迅速发展的经济与传统能源已出现供需失衡问题，能源危机正引起全球关注[1]。所以，建立以可再生清洁能源（包括太阳能、风能、生物质能、海洋能等）为核心的可持续能源体系，是解决能源短缺和环境安全问题的重要途径。风能、水能、生物质能、海洋温差能和潮汐能等均来源于太阳，太阳能资源是国际公认为未来最具竞争力的新能源之一。因此，国内外很多学者对太阳辐射的分布规律及影响因素进行了多方面的研究[2-12]。左大康等[2]最早对我国太阳总辐射的空间分布特征进行研究并绘制了我国各月总辐射与年总辐射分布图；马金玉等[3]利用近半个世纪全国58个气象站的地面太阳总辐射观测资料，分析了近50 a来全国及区域地面太阳总辐射的年际、季节长期变化趋势特征、年代际距平、周期和突变点；黄家敏等[4]利用GEWEX-SRB数据对新疆1984—2007年的辐照度进行分析，得到新疆近24 a的太阳总辐射时空变化趋势。另外，研究表明气溶胶、风沙、云量等都会对太阳总辐射产生不同程度的影响[10-12]。

新疆位于中国西北边陲，地处73°40′~96°18′E，34°25′~48°10′N之间，全年日照时数为2300~3300 h，日照百分率为60%~80%，居全国第二位，仅次于青藏高原[13]。新疆四周高山环绕且深居内陆，形成独特的温带大陆性气候，加之温差大、降水量少等气候条件，使所有到达地表的太阳辐射均受到气候

收稿日期：2020-08-28；　**修订日期**：2021-06-18

基金项目：新疆维吾尔自治区科技厅重大科技专项（2016A03008-04-03）；NJ新增水资源战略研究项目（403-1005-YBN-FT6I-8）；中国科学院大学生创新实践训练计划项目资助

作者简介：顾玮（1998-），女，本科生，主要从事干旱区生态遥感应用研究. E-mail: 1758715191@qq.com

通讯作者：古丽·加帕尔（1973-），女，博士，研究员，主要从事干旱区生态遥感研究. E-mail: glmr@ms.xjb.ac.cn

条件和大气下垫面特性的影响。新疆太阳能资源在同纬度上高于华北、东北地区，也比低纬度的长江中下游地区和华南地区高，其中，新疆南疆地区（简称南疆地区）尤为丰富。但由于新疆太阳辐射观测站点稀疏，太阳总辐射资料缺乏等原因[13]，目前对太阳能资源的区域分布和可利用区域的认识还不够。因此，本文分析了南疆地区太阳总辐射的时空变化规律，并提出南疆地区太阳能资源分区利用建议，旨在阐明南疆地区太阳总辐射变化趋势及可利用区域空间分布格局，也可为低成本生态利用技术集成与工程化应用提供理论支撑。

1 数据来源及精度分析

太阳总辐射数据来源于中国科学院青藏高原研究所开发的中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集（ITPCAS）中的地面向下短波辐射资料[14]，该数据集基于Princeton再分析资料、GEWEX-SRB辐射资料、GLDAS资料以及TRMM降水数据，由中国地面气象观测数据作为融合资料制作而成；拥有3 h时间分辨率和0.1°水平空间分辨率，时间序列长度为1979—2015年[15]。气象数据包括：1980—2015年中国地面气象逐月日照与风向风速格点数据集和中国气象辐射基本要素日值数据集，来源于中国气象数据网（http://data.cma.cn）；其他辅助数据包括：中国人口空间分布公里网格数据集、2015年中国土地利用现状遥感监测数据和新疆县级行政区划矢量边界，来源于中国科学院资源环境科学数据中心。

由于当前使用地面站点信息的主流遥感反演产品较少，特别是在中国寒区、旱区，并且数据精度还存在一定误差。利用地面气象站数据对遥感产品进行数据融合、再分析得到的产品不仅满足了数据的空间分布要求，而且提高了精度，为进一步研究做出了重要贡献。本研究为验证数据的适用性，将研究区内5个辐射站地面实测年、日太阳总辐射数据与相应的ITPCAS数据进行对比。年太阳总辐射数据选取时间序列数据进行精度验证（表1），日太阳总辐射数据随机选取2015年4个季度任意10 d的辐射站实测日数据作为自变量，相应台站的ITPCAS地面向下短波辐射日数据为因变量做散点拟合（图1）。

结果显示，再分析数据集中年太阳总辐射与站点实测年太阳总辐射相关系数高于0.880（表1），表明该辐射数据集与辐射站实测数据的相关性和一致性良好，通过该数据集估算的辐射要素可以较好地反映区域年度变化规律。而5个辐射站日太阳总辐射的相关系数均在95%以上（图1），能够满足南疆地区太阳总辐射的时空分布特征和评价该区的太阳能资源的要求。

2 研究方法

2.1 太阳能资源时空分布特征分析

2.1.1 趋势分析 通常采用一元线性回归[16]分析时间尺度上太阳总辐射的变化趋势。本文计算长时间序列每个栅格的多年变化趋势，从而得到拟合回归直线的斜率，来表征研究时段内每个栅格点太阳总辐射量的变化趋势。斜率为正，表明栅格内太阳总辐射增加，且数值越大说明增加越明显；反之则表明该栅格内太阳总辐射减少。该方法能反映太阳总辐射在不同时期的时空分布特征，计算公式下：

$$\text{slope} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i t_i - \frac{1}{n}\left[\sum_{i=1}^{n} x_i \left(\sum_{i=1}^{n} t_i\right)\right]}{\sum_{i=1}^{n} t_i^2 - \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} t_i\right)^2} \tag{1}$$

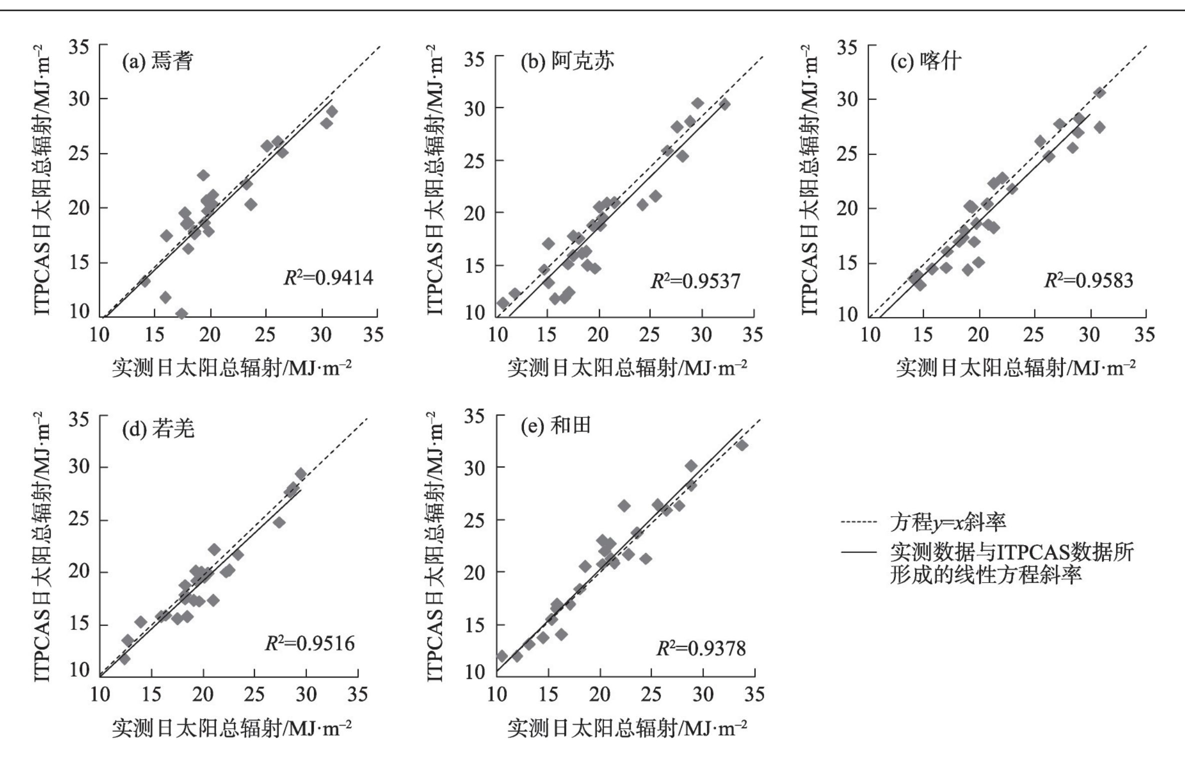
式中：slope为趋势线的斜率（%·a^{-1}）；x_i 为第i年的

表1 再分析数据集与辐射站年太阳总辐射对比

Tab. 1 Comparison of annual total solar radiation between reanalysis data set and radiation stations

站点	年均太阳总辐射/MJ·m^{-2}		误差/MJ·m^{-2}	相对误差/%	相关系数
	辐射站	再分析数据集			
焉耆	5870.41	5905.69	35.28	0.006	0.963**
阿克苏	5615.95	5646.37	29.42	0.005	0.882*
喀什	6089.24	6125.68	36.44	0.006	0.893*
若羌	5769.71	5786.45	16.74	0.003	0.942**
和田	5807.70	5837.31	29.61	0.005	0.912*

注：P<0.05即通过显著性检验，*表示P<0.05，**表示P<0.01。



注：ITPCAS为中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集。

图1 ITPCAS与辐射站实测日太阳总辐射数据对比

Fig. 1 Comparison of daily total solar radiation data between ITPCAS and radiation stations

太阳总辐射量(MJ·m^{-2})；t_i为第i年；n为研究时间序列的长度，即36(1980—2015年共36 a)。

2.1.2 重标极差*R/S*分析 重标极差(*R/S*)分析是一种基于长时间序列记忆分析的方法[17]。该方法主要计算原理如下所述[18]：

给定时间序列{$\mathrm{MPDI}_{(t)}$，t=1, 2, …, n}对于任意正整数τ，定义该时间序列的均值序列：

$$\overline{\mathrm{MPDI}}_{(\tau)}=\frac{1}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau}\mathrm{MPDI}_{(t)},\quad t=1,2,\cdots,n \tag{2}$$

计算累积离差：

$$X_{(t,\tau)}=\sum_{t=1}^{\tau}\left(\mathrm{MPDI}_{(t)}-\overline{\mathrm{MPDI}}_{(\tau)}\right),\quad 1\leqslant t\leqslant\tau \tag{3}$$

计算极差：

$$R_{(\tau)}=\max_{1\leqslant t\leqslant\tau}X_{(t,\tau)}-\min_{1\leqslant t\leqslant\tau}X_{(t,\tau)},\quad \tau=1,2,\cdots,n \tag{4}$$

计算标准差：

$$S_{(\tau)}=\sqrt{\frac{1}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau}\left(\mathrm{MPDI}_{(t)}-\overline{\mathrm{MPDI}}_{(\tau)}\right)^2},\quad \tau=1,2,\cdots,n \tag{5}$$

式中：τ为任意正整数；$\mathrm{MPDI}_{(t)}$为给定的时间序列；t为某一时刻；$\overline{\mathrm{MPDI}}_{(t)}$为给定时间序列的平均值；$\max X_{(1,\tau)}$为最大累积离差；$\min X_{(1,\tau)}$为最小累积离差。

若存在$R/S\propto\tau^H$，则说明{$\mathrm{MPDI}_{(t)}$，t=1, 2, …, n}时间序列存在Hurst现象，其中H值称为Hurst指数。当H=0.5时，表明时间序列变化前后无关；当H>0.5时，表明时间序列变化前后正相关，具有长期相关的特性，即未来发展变化趋势与过去相近，过去增加的趋势预示未来也将增加，反之则减少；当H<0.5时，表明时间序列变化前后负相关，即过去增加的趋势预示未来也将减少，反之则增加。

为了解南疆地区太阳总辐射变化趋势的持续性，将变化速率图与Hurst指数分布图进行叠加获得太阳总辐射变化趋势的持续性特征分布。根据slope不同值像元面积所占百分比的突变点对变化速率确定分级标准，并结合Hurst指数对南疆地区太阳能资源变化趋势进行分级(表2)。

2.1.3 小波分析 小波分析是一种时、频多分辨率分析方法[19]，反映时间和频率的区域变换，能有效从信号中提取信息，通过伸缩和平移等运算功能对函数或信号进行多尺度细化[20]。为进一步识别时间序列的周期成分及在时域上的分布，本文利用Morlet小波对地面太阳总辐射进行周期性分析。Morlet小波定义如下：

$$W_f(a,b)=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_R f(t)\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)\mathrm{d}t \tag{6}$$

$$\psi(t')=\frac{1}{\sqrt{a}}\mathrm{e}^{ict'-t'^2/2} \tag{7}$$

表2 太阳能资源变化趋势分级

Tab. 2 Classification of solar energy resources change trend

变化速率/%·a-1	Hurst指数	太阳能资源变化趋势
>10.0	>0.5	持续且明显增加
0.9~10.0	>0.5	持续且轻微增加
>0.9	<0.5	反持续且从减少到增加
−0.9~0.9	−	稳定
<−0.9	<0.5	反持续且从增加到减少
−3.0~−0.9	>0.5	持续且轻微减少
<−3.0	>0.5	持续且明显减少

注:−表示Hurst指数为0。

式中:$W_f(a,b)$为小波变换系数;$f(t)$为一个信号或平方可积函数;t为时间尺度;R为全体实数;$a>0$为尺度参数;b为时间位置参数;$\psi(t')$为Morlet小波函数;$t'=\frac{t-b}{a}$;i为虚部;c为常数。

2.2 太阳能资源利用区划

2.2.1 区划分级指标体系构建 太阳能资源开发的可行性、规模和强度是资源环境和社会经济系统综合影响的结果,受到社会、环境、资源、经济等诸多因素的影响。结合南疆地区特点,考虑到数据的可获性和可比性,本研究率先选取太阳能资源丰富度、稳定度、利用价值开展太阳能资源评价、太阳总辐射变化趋势、沙尘天气频次、人口丰富度、陆路交通可达性以及土地利用情况等指标构建太阳能资源区划分级指标体系,对每一指标按照不同的分级标准进行分级[21−23],并进行空间属性叠加,依据空间属性特征进行区划分级(表3)。

2.2.2 太阳能资源评价指标

(1) 丰富度

根据太阳能资源评估方法[21],以年太阳总辐射为指标,进行太阳能资源丰富度的评估,其等级见表4。

(2) 稳定度

太阳能资源稳定度由每月日照时数的最大值与最小值之比大于6 h天数表示[21],其等级划分如表5所示,计算公式如下:

$$K=\frac{\max(D_1,D_2,\cdots,D_{12})}{\min(D_1,D_2,\cdots,D_{12})} \tag{8}$$

表3 太阳能资源区划分级指标体系

Tab. 3 Index system of solar energy resource zoning classification

级别	内涵	分级指标
Ⅰ级可利用区	指有良好的太阳能资源禀赋基础,沙尘天气、人口、交通基础设施等影响太阳能资源开发的条件较好,能够使太阳能资源实现规模化开发的地区。	将太阳能资源丰富、稳定、利用价值较高且具有持续增加趋势,沙尘天气较少、人口相对较多且陆路交通可达性良好的可开发区域判别为Ⅰ级可利用区。
Ⅱ级可利用区	指有一定太阳能资源禀赋基础,沙尘天气、人口、交通基础设施等影响太阳能资源开发的条件一般,能够实现大规模农产品生长发育的地区。	将太阳能资源丰富、稳定、利用价值高且具有持续增加趋势,沙尘天气多、人口较少且基础交通设施一般的可开发区域判别为Ⅱ级可利用区。
Ⅲ级可利用区	指有太阳能资源禀赋基础,但地处自然保护区且沙尘天气、人口、交通基础设施等影响太阳能资源开发的条件较差,使太阳能资源实现规模化开发受到较大约束的地区。	剔除Ⅰ级可利用区和Ⅱ级可利用区后,剩余地区判别为Ⅲ级可利用区。

表4 太阳能资源丰富度等级划分

Tab. 4 Classification of solar energy resource richness

年太阳总辐射/MJ·m-2	丰富度
<3780	一般
3780~5040	丰富
5040~6300	很丰富
>6300	极丰富

表5 太阳能资源稳定度等级划分

Tab. 5 Classification of solar energy resource stability

太阳能资源稳定度指标(K)	稳定度
<2	稳定
2~4	较稳定
>4	不稳定

式中:K为太阳能资源稳定度指标;$D_1,D_2,\cdots,D_{12}$为1—12月各月日照时数大于6 h的天数(d)。

(3) 利用价值

太阳能资源利用价值的评估中,以各月日照时数大于6 h的天数作为其可利用指标来反映该区域太阳能资源的利用价值[21]。借助此评价标准,统计出研究区1980—2015年30个气象观测站大于6 h的天数并计算平均值。同时,根据南疆地区太阳能资源的特殊情况对该天数进行分级(表6)。

(4) 其他评价指标

其他指标包括沙尘天气频次、人口丰富度、陆路交通可达性以及土地利用情况。

表6 太阳能资源利用价值等级划分

Tab. 6 Classification of solar energy resource utilization value

各月日照时数大于6 h天数/d	利用期
<240	长
240~280	很长
>280	极长

沙尘天气频次：由于塔克拉玛干沙漠位于南疆腹地，下垫面干燥而且植被覆盖率少。故该区沙尘天气的发生频次主要取决于风速、下垫面的干湿状况以及冷空气活动的频率等。因此，风速对沙尘天气的发生具有决定性作用[22]。本研究基于周成龙等[23]临界起沙风速阈值分析，采用Bagnold[24]沙粒临界启动速度公式，对南疆地区超临界起沙风速天数进行统计，并利用气象站点实测沙尘天气日数对比验证（图2）。两者相关系数达到95%以上，说明超临界起沙风速日数可真实反映南疆地区沙尘天气发生频次。故对该日数进行等级划分（表7），评价结果见图3a。

人口丰富度：新疆是中国陆地面积最大的省级行政区，面积为166×10⁴ km²，占中国国土总面积1/6，但人口仅占全国总人口的3%。而南疆地区更是承接了新疆地广人稀的特点，故将南疆地区人口等级划分标准做了调整（表8），评价结果见图3b。

陆路交通可达性：采用刘海隆等[25]关于新疆交通可达性的研究结果，作为南疆地区该指标的评价结果（图3c）。

土地利用情况：土地利用是太阳能资源开发利

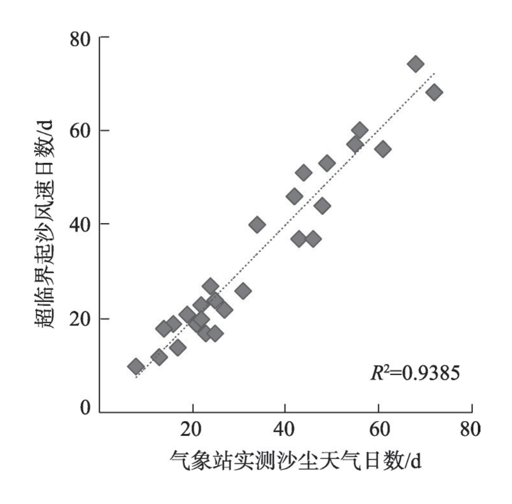


图2 超临界起沙风速日数与气象站实测沙尘天气日数对比

Fig. 2 Comparison of the days of supercritical sand velocity and the measured dust weather days in meteorological stations

表7 沙尘天气频次等级划分

Tab. 7 Classification of sand-dust weather frequency

沙尘天气频次/d	等级
<30	一般
30~45	较高
>45	高

表8 人口丰富度等级划分

Tab. 8 Classification of population richness

人口密度/人·km^{-2}	人口丰富度
8~20	稀少
20~100	一般
100~1000	较密集
>1000	密集

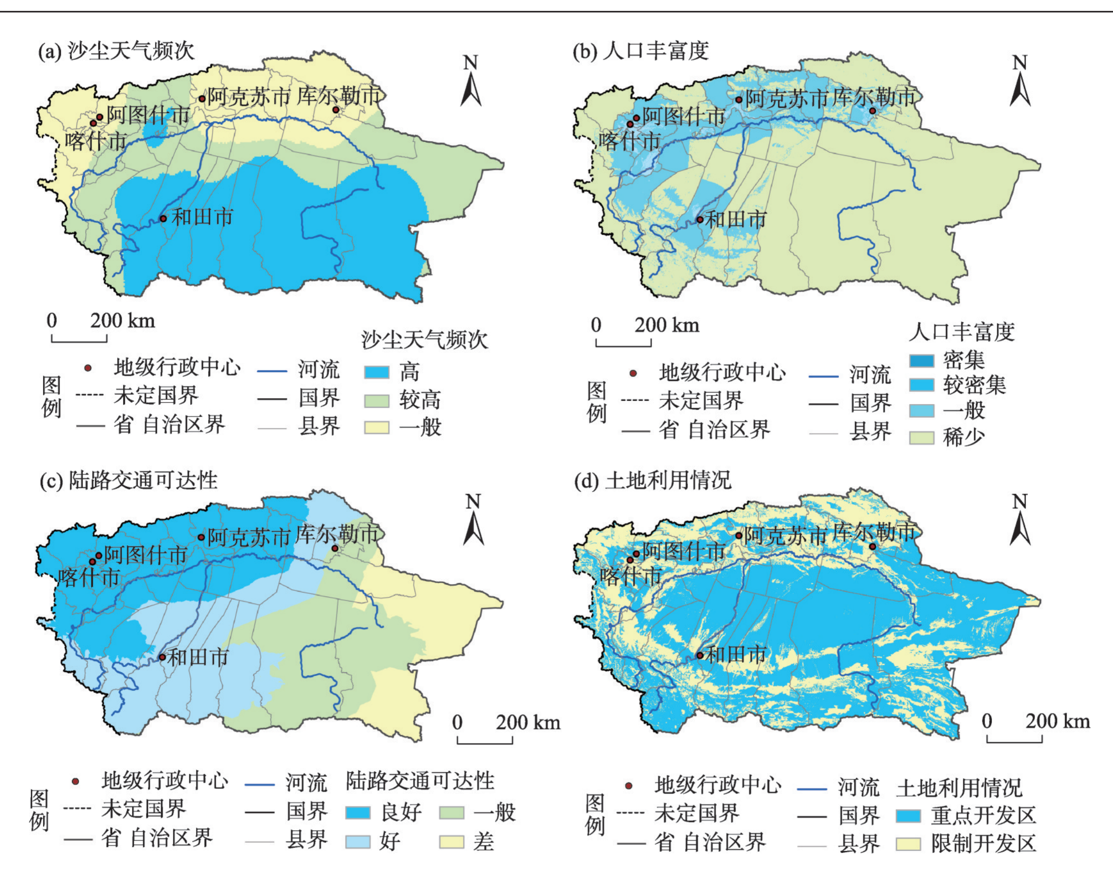
用的关键因素。本研究采用2015年中国土地利用现状遥感监测数据，以太阳能资源是否可开发为目的，对各类土地利用类型进行了甄别。将农田、林地、自然保护区等设为限制开发区，将城乡、工矿、居民用地以及未利用地设为重点开发区，结果见图3d。

3 结果与分析

3.1 南疆地区太阳辐射时空分布变化分析

1980—2015年南疆地区的年太阳总辐射总体呈波动上升趋势（图4a），每年的变化速率为2.09 MJ·m^{-2}。在研究期内，太阳总辐射显现出2次波动，并在1987年出现最小值（5893.49 MJ·m^{-2}），在2009年达到最大值（6444.75 MJ·m^{-2}）。这与国内很多学者得出的在1990年前后我国地表太阳辐射从“变暗”开始逐渐“变亮”的研究结果相吻合[26-28]。为探究研究区太阳总辐射是否存在周期性变化，通过Morlet小波分析，得到研究区年太阳总辐射周期性变化（图4b）。1980—1994年为第一个周期，在此周期内有弱的负距平和强的正距平，但没有相互转化；1995—2009年为第二个周期，负距平向正距平转化且在这个周期内闭合线密集，说明太阳总辐射波动比前后期都明显；至2015年后，一个新的负距平周期将形成。由此可见，虽然南疆地区年太阳总辐射有上升趋势，但上升速率有所减慢且趋势不显著，但每10~15 a会出现一次波动，且都在正常的波动范围内。

Hurst指数可以反映时间序列前后太阳总辐射



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)3266号的标准地图制作。下同。

图3 1980—2015年南疆地区其他评价指标评价结果

Fig. 3 Assessment results of other evaluation indicators in southern Xinjiang during 1980—2015

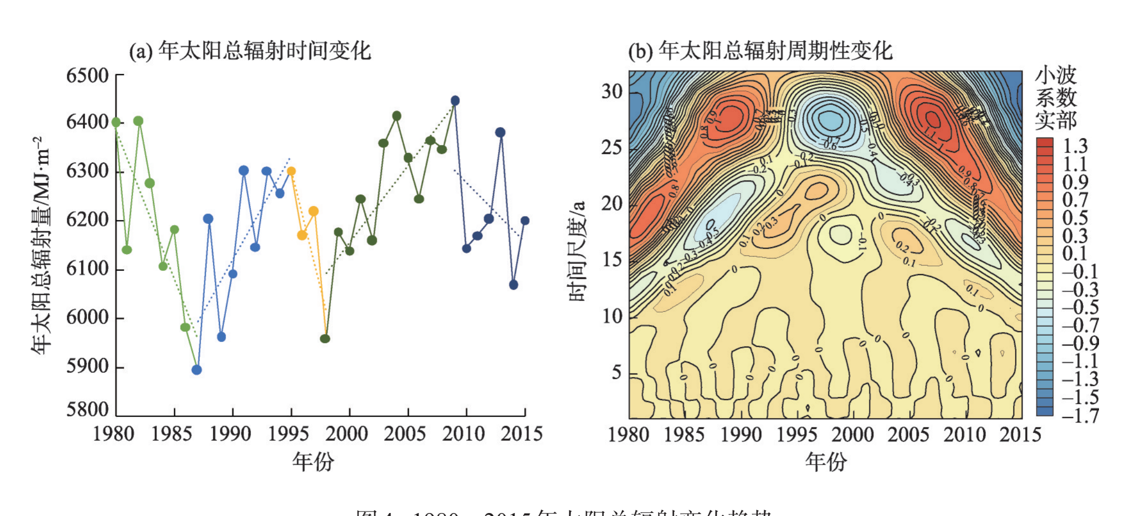


图4 1980—2015年太阳总辐射变化趋势

Fig. 4 Variation trend of total solar radiation during 1980—2015

是否呈现持续性变化，通过*R*/*S*重标极差分析，得到南疆地区太阳总辐射Hurst指数空间分布(图5a)。南疆地区Hurst指数平均值为0.673。为进一步了解南疆地区太阳总辐射变化趋势，将变化速率图与Hurst指数分布图进行叠加获得太阳能资源变化趋势分布(图5b)。从中可以看出，研究区太阳总辐射持续增加区域所占面积比例为58.63%，集中分布在塔克拉玛干沙漠腹地、喀拉昆仑山、和田及喀什绿洲地区，其中，持续且明显增加区域占20.53%，持续且轻微增加区域面积占比为38.10%，主要受气温持续增高的影响[29]。而持续减少区域主要集中在南疆地区的若羌、塔什库尔干县以及开孔河流域上游

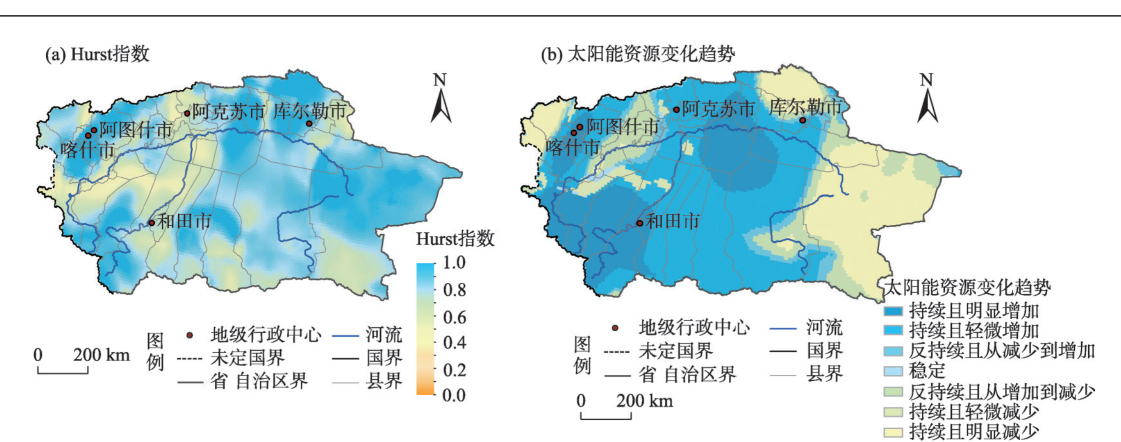


图5　南疆地区太阳总辐射Hurst指数空间分布及太阳能资源变化趋势

Fig. 5　Spatial distributions of Hurst index of total solar radiation and variation trend of solar energy resources in southern Xinjiang

山区，所占面积比例为22.88%。若羌县太阳辐射持续减少，主要受该地区沙尘天气的影响，气溶胶的散射和吸收使太阳辐射被削弱[30]；而塔什库尔干及开孔河上游山区受云量影响较大，塔什库尔干气温呈上升趋势，开孔河山区气温则呈现下降趋势，两地区降雨量均在增加[29]。维持现状稳定不变的区域面积占比为0.88%，主要零星分布于叶尔羌河中游段。太阳总辐射呈现非持续性变化特征的地区分布面积不大，其中由增加转为减少区域主要集中在且末县、叶尔羌河流域中部地区，占总面积的11.82%，呈现先减少后增加的地区大都在塔克拉玛干沙漠与绿洲交界处，占总面积的5.79%。

3.2　太阳能资源评价

由南疆地区太阳能资源丰富度、稳定度、利用价值重要性指标评价结果(图6)可以看出，该区太阳能资源“极丰富”区域分布于昆仑山系沿线地区，其他区域均为太阳能资源“丰富”地区。其主要原因是南疆地区的地理特征和气候条件同其他地区有着明显的差异，该区属干旱地区，云雨量少、风沙和尘暴多、高山盆地相间、沙漠环绕绿洲[31]。且南疆地区山区西高东低，南高北低，气流很难从西部低空直达塔里木盆地，主要以西部几个凹陷处为入口入境，从而在西北部形成更多的云和降水，迫使太阳辐射减弱；而云雨少的东南部则辐射量增大。另外，由于地形的阻塞，塔里木盆地的气流无法前进，迫使气流向上运动，但地面覆盖少，气候干燥，上升的气流会将地面大量沙尘卷扬在空中，从而使这一带尘土风沙较多，故该区太阳辐射相对较弱。

太阳能资源“稳定”区域主要集中分布在南疆地区的中南部，面积占比约为36.3%；同时，太阳能



图6　1980—2015年南疆地区太阳能资源评价

Fig. 6　Evaluation of solar energy resources in southern Xinjiang during 1980—2015

资源较为稳定区域面积占比为46.2%，不稳定区域面积占比为17.5%。太阳能资源利用期在南疆地区均较长。其中，“利用期极长”的区域主要分布在南疆地区的东南部地区。另外，日照时数大于6 h的平均天数最长为若羌，达到310 d；最短为塔中站，为213 d。说明在不考虑成本、技术可行性的前提下，南疆地区太阳能资源具有较高的潜在利用价值。

3.3 太阳能资源综合利用区划

资源综合利用区划的目的是反映太阳能资源开发系统中不同要素不同功能类型之间的差异，规范和指引太阳能资源勘查开发的方向、时序和重点，从而为资源空间优化配置提供支撑。根据太阳能资源区划分级指标体系（表2），结合“三基地一通道”建设及新疆区域发展与扶贫攻坚规划等南疆地区太阳能资源开发的一系列战略部署，并参考现有资源类综合区划和功能区划的研究[31-36]，本文将南疆地区太阳能资源划分为Ⅰ级可利用区、Ⅱ级可利用区、Ⅲ级可利用区（图7）。

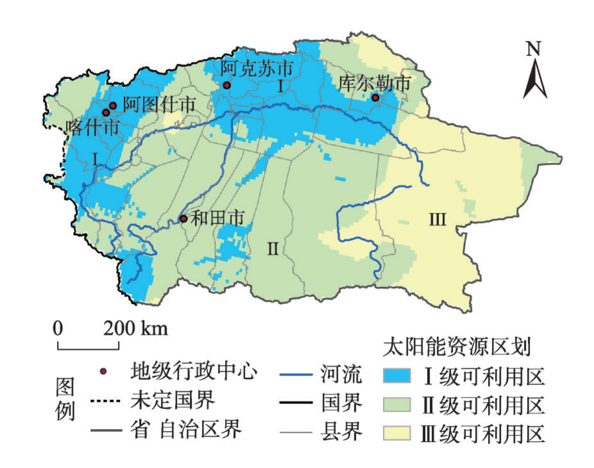


图7 南疆地区太阳能资源利用区划

Fig. 7 Solar energy resources utilization regionalization in southern Xinjiang

Ⅰ级可利用区。该区主要包括阿克苏、喀什、和田、库尔勒等地区。年太阳总辐射大于5200 MJ·m^{-2}，日照时数在240~280 d之间且较稳定。该区年日照时数较多，具有持续且增加趋势的可开发区域基本位于太阳总辐射的丰富区内。阿克苏、喀什、和田、库尔勒地区人口密集，工农业发展相对较快，陆路交通可达性良好，光伏利用潜力及可利用性高，工程投入相对较少。在这一地区，应加强太阳能资源的勘察及开发，挖掘太阳能资源潜力，不断提高太阳能资源供给能力，为直接开发利用光电提供源泉。

Ⅱ级可利用区。该区在南疆地区分布最为广泛，基本上南疆地区1/2的地方都属于该区，包括南疆中部大部分地区。该区域太阳总辐射在5800~6500 MJ·m^{-2}，日照时数均值在295 d且基本处于稳定。该区位于塔里木盆地及边缘地带，沙尘天气较多且人口相对于Ⅰ级可利用区较少，陆路交通可达性一般，但该区是刚刚脱贫摘帽连片深度贫困地区之一，亦是南疆地区主要果蔬农产的生产区域，也是全疆绿色农产品生产基地所在地之一，是太阳能资源利用的最佳区域。可在该区域推广应用农业温室、太阳能采暖、太阳能热水器等。此外，该区主要还是荒漠植被广布区域，生态环境脆弱、地表水匮乏，可利用光伏供电来抽取地下水资源来实现植被保育及恢复。

Ⅲ级可利用区。该区主要包括若羌等地区。地处塔克拉玛干沙漠东南缘，高山盆地相间，东南部和南部为昆仑山—阿尔金山山地，年太阳总辐射量丰富，日照时数长且处于稳定。但该区人口、基础交通设施条件较差，区内有大型自然保护区，风速较大，大风可能会影响电池板的安全，导致光伏组件被大风吹翻；此外，极端大风还会降低支架的防腐性能，该区域可联合风力及光伏发电。风速较大地区以风力发电为主，其他地区推进分布式光伏电站和独立微网建设，从而利用太阳能的独特优势来解决电网和交通不便地区的能源短缺问题。

4 结论

（1）南疆地区太阳能资源空间分布呈现两大特征：一是有明显的年际变化特征，总体呈现增长趋势，且每10~15 a出现一次波动，但都在正常的波动范围内。二是太阳能资源丰富且稳定，具有良好的利用价值。在空间分布上南多北少，同纬度相比山区多，平原少。其中，昆仑山系一带太阳能资源最丰富且较稳定。

（2）在全国太阳能资源区划的基础上，根据南疆地区的太阳总辐射时空分布变化规律与太阳能资源分析评价，结合风沙天气频次、人口丰富度、陆路交通可达性等太阳能资源利用区划评价指标体系，将全区太阳能资源分为3个区：阿克苏、喀什、和

田等地区为Ⅰ级可利用区；塔里木盆地及边缘地带为Ⅱ级可利用区；若羌地区为Ⅲ级可利用区。

（3）Ⅰ级可利用区有良好的太阳能资源禀赋基础，沙尘天气、人口、交通基础设施等影响太阳能资源开发的条件较好，是综合利用光电与光生物质能的最佳区域；Ⅱ级可利用区有一定太阳能资源禀赋基础，沙尘天气、人口、交通基础设施等影响太阳能资源开发的条件一般，可在该区域推广应用农业温室、太阳能采暖等；Ⅲ级可利用区有太阳能资源禀赋基础，区域内包括自然保护区且大风天气、人口、交通基础设施等影响太阳能资源开发的条件较差，可大力推进分布式光伏电站和独立微网建设。

参考文献（References）

[1] 刘佳, 何清, 刘蕊, 等. 新疆太阳辐射特征及其太阳能资源状况[J]. 干旱气象, 2008, 26(4): 61−66. [Liu Jia, He Qing, Liu Rui, et al. Solar radiation character and solar energy resource in Xinjiang[J]. Journal of Arid Meteorology, 2008, 26(4): 61−66.]

[2] 左大康, 王勃贤, 陈建绥. 中国地区太阳总辐射的空间分布特征[J]. 气象学报, 1963, 33(1): 78−96. [Zuo Dakang, Wang Boxian, Chen Jiansui. Characteristics of the distribution of total radiation in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1963, 33(1): 78−96.]

[3] 马金玉, 罗勇, 梁宏, 等. 中国近半个世纪地面太阳总辐射时空变化特征[J]. 自然资源学报, 2012, 27(2): 268−280. [Ma Jinyu, Luo Yong, Liang Hong, et al. Spatial and temporal variation of total solar radiation in China in recent 50 years[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(2): 268−280.]

[4] 黄家敏, 杨洪海, 陈勇航, 等. 基于GEWEX-SRB资料的新疆地区太阳辐射时空分布特征[J]. 太阳能学报, 2017, 38(2): 516−523. [Huang Jiamin, Yang Honghai, Chen Yonghang, et al. Spatial and temporal distribution of solar radiation in Xinjiang area based on GEWEX-SRB data[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2017, 38(2): 516−523.]

[5] 吴林荣, 杜莉丽, 王娟敏, 等. 陕北榆林地区太阳能资源空间分布特征及资源潜力评估[J]. 水土保持通报, 2013, 33(1): 238−242. [Wu Linrong, Du Lili, Wang Juanmin, et al. Distribution charateristics and evaluation of potential solar energy resources in Yulin region of northern Shaanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(1): 238−242.]

[6] Stanhill G, Moreshet S. Global radiation climate changes: The world network[J]. Climatic Change, 1992, 21(1): 57−75.

[7] Stanhill G, Cohen S. Recent changes in solar irradiance in Antarctica[J]. Climate, 1997, 10: 2078−2086.

[8] Stanhill G. Estimation of direct solar beam irradiance from measurements of the duration of bright sunshine[J]. International Journal of Climatology, 1998, 18(3): 347−354.

[9] 周扬, 吴文祥, 胡莹, 等. 西北地区太阳能资源空间分布特征及资源潜力评估[J]. 自然资源学报, 2010, 25(10): 1738−1749. [Zhou Yang, Wu Wenxiang, Hu Ying, et al. The temporal-spatial distribution and evaluation of potential solar energy resources in northwest China[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(10): 1738−1749.]

[10] 高庆先, 任阵海, 李占青, 等. 中国北方沙尘气溶胶时空分布特征及其对地表辐射的影响[J]. 资源科学, 2004, 26(5): 2−10. [Gao Qingxian, Ren Zhenhai, Li Zhanqing, et al. Spatial and temporal distribution of dust aerosol and its impacts on radiation based on analysis of EP/TOMS satellite data[J]. Resources Science, 2004, 26(5): 2−10.]

[11] 陈春美, 钟珂, 陈勇航, 等. 干旱区典型城市云对太阳辐射的影响[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 436−443. [Chen Chunmei, Zhong Ke, Chen Yonghang, et al. Effects of clouds on solar radiation over typical city in arid area[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 436−443.]

[12] 姬兴杰, 贾志军, 肖国杰. 近60年郑州市地面太阳辐射变化的影响因素分析[J]. 太阳能学报, 2017, 38(5): 1211−1219. [Ji Xingjie, Jia Zhijun, Xiao Guojie. Analysis of influence factors of surface solar radiation in Zhengzhou City over recent 60 years[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2017, 38(5): 1211−1219.]

[13] 刘羽, 张显峰, 吕扬. 基于风云卫星数据的新疆太阳能资源潜力评价方法研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(7): 1295−1303. [Liu Yu, Zhang Xianfeng, Lü Yang. Solar energy potential mapping and assessment in Xinjiang (China) based on the FY satellite data[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2014, 35(7): 1295−1303.]

[14] 何杰, 阳坤. 中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集[DB/OL]. 寒区旱区科学数据中心, 2011. [He Jie, Yang Kun. China meteorological forcing dataset[DB/OL]. Cold and Arid Regions Science Data Center at Lanzhou, 2011.]

[15] Chen Y Y, Yang K, He J, et al. Improving land surface temperature modeling for dry land of China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, 116(D20): D20104, doi: 10.1029/2011JD015921.

[16] 罗敏, 古丽·加帕尔, 郭浩, 等. 2000—2013年塔里木河流域生长季NDVI时空变化特征及其影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(1): 50−63. [Luo Min, Jiapaer Guli, Guo Hao, et al. Spatial-temporal variation of growing-season NDVI and its responses to hydrothermal condition in the Tarim River Basin from 2000 to 2013[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(1): 50−63.]

[17] 李芳. 张掖市植被覆盖动态变化及其与气象因子的关系[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2011. [Li Fang. Dynamic analysis of vegetation cover and relationships with climate factors in Zhangye region[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2011.]

[18] 陈彦光. 地理数学方法: 基础和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 463−473. [Chen Yanguang. Mathematical methods for geography: Foundations and applications[M]. Beijing: Science Press, 2011: 463−473.]

[19] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007. [Wei Fengying. Statistics diagnosis and prediction of modern climate[M]. Beijing: Meteorological Press, 2007.]

[20] 马金玉, 罗勇, 申彦波, 等. 近50年中国太阳总辐射长期变化趋势[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(10): 1597-1608. [Ma Jinyu, Luo Yong, Shen Yanbo, et al. Regional long-term trend of ground solar radiation in China over the past 50 years[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2012, 42(10): 1597-1608.]

[21] 章毅之, 王怀清, 胡菊芳. QX/T89 - 2008. 太阳能资源评估方法[S]. 中华人民共和国气象行业标准, 2008. [Zhang Yizhi, Wang Huaiqing, Hu Jufang. QX/T89-2008. Solar energy resource assessment method[S]. People's Republic of China Meteorological Industry Standard, 2008.]

[22] 王森, 王雪姣, 陈东东, 等. 1961—2017年南疆地区沙尘天气的时空变化特征及影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(9): 81-86. [Wang Sen, Wang Xuejiao, Chen Dongdong, et al. The spatial and temporal variation characteristics and influencing factors of dust weather in the southern Xinjiang from 1961 to 2017[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(9): 81-86.]

[23] 周成龙, 买买提艾力·买买提依明, 杨兴华, 等. 基于模式参数化方案的塔中地区临界起沙阈值分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41(5): 930-936. [Zhou Chenglong, Mamtimin Ali, Yang Xinghua, et al. Critical threshold velocity of dust emission in Tazhong area based on the parameterization schemes[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(5): 930-936.]

[24] Bagnold. The physics of blown sand and desert dunes[M]. London: Methuen, 1941.

[25] 刘海隆, 包安明, 陈曦, 等. 新疆交通可达性对区域经济的影响分析[J]. 地理学报, 2008, 63(4): 428-436. [Liu Hailong, Bao Anming, Chen Xi, et al. The effect of transport accessibility on regional economic performance[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(4): 428-436.]

[26] Wild M, Gilgen H, Roesch A, et al. From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at Earth's surface[J]. Science, 2005, 308(5723): 847-850.

[27] Tang B H, Li Z L, Zhang R H. A direct method for estimating net surface shortwave radiation from MODIS data[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 103(1): 115-126.

[28] 许建明, 何金海, 阎凤霞. 1961—2007年西北地区地面太阳辐射长期变化特征研究[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(1): 89-96. [Xu Jianming, He Jinhai, Yan Fengxia. Research on secular variation of solar radiation over northwest China from 1961 to 2007[J]. Climatic and Environmental Research, 2010, 15(1): 89-96.]

[29] Jiang L L, Jiapaer Guli, Bao A M, et al. Monitoring the long-term desertification process and assessing the relative roles of its drivers in Central Asia[J]. Ecological Indicators, 2019, 104: 195-208.

[30] 彭艳, 王钊, 李星敏, 等. 近50 a西安太阳辐射变化特征及相关影响因子分析[J]. 干旱区地理, 2012, 35(5): 738-745. [Peng Yan, Wang Zhao, Li Xingmin, et al. Variation characteristics of solar radiation and its impact factors of Xi'an in recent 50 years[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(5): 738-745.]

[31] 冯刚, 李卫华, 韩宇, 等. 新疆太阳能资源及区划[J]. 可再生能源, 2010, 28(3): 133-139. [Feng Gang, Li Weihua, Han Yu, et al. The solar energy resources of Xinjiang and its distribution[J]. Renewable Energy Resources, 2010, 28(3): 133-139.]

[32] 颜亮东, 周秉荣, 李晓东, 等. 三江源地区太阳能资源区划及利用潜力研究[J]. 资源科学, 2012, 34(11): 2057-2066. [Yan Liangdong, Zhou Bingrong, Li Xiaodong, et al. The utilization potential and division of solar energy resources across "Three-River-Source"[J]. Resources Science, 2012, 34(11): 2057-2066.]

[33] 龚强, 于华深, 蔺娜, 等. 辽宁省风能、太阳能资源时空分布特征及其初步区划[J]. 资源科学, 2008, 30(5): 654-661. [Gong Qiang, Yu Huashen, Lin Na, et al. Temporal-spatial distribution and regionalization of wind and solar energy resources in Liaoning Province[J]. Resources Science, 2008, 30(5): 654-661.]

[34] 王丽平, 段四波, 张霄羽, 等. 2003—2018年中国地表温度年最大值的时空分布及变化特征[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1299-1308. [Wang Lipin, Duan Sibo, Zhang Xiaoyu, et al. Spatio-temporal distribution and variation characteristics of annual maximum land surface temperature in China during 2003—2018[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1299-1308.]

[35] 张玉韩, 侯华丽, 沈悦, 等. 乌蒙山片区矿产资源开发功能分区及扶贫政探索[J]. 资源科学, 2018, 40(9): 1716-1729. [Zhang Yuhan, Hou Huali, Shen Yue, et al. Study on the functional division of mineral resources development and poverty alleviation policy in Wumeng Mountain Area[J]. Resources Science, 2018, 40(9): 1716-1729.]

[36] 王勇, 赵战成, 晏军, 等. 新疆雪灾的时空分布特征及其等级划分[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 577-583. [Wang Yong, Zhao Zhancheng, Yan Jun, et al. Spatial and temporal distribution characteristics and its classification of snow disaster in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 577-583.]

Spatial and temporal distribution characteristic and division research of solar energy resources in southern Xinjiang

GU Wei[1,2], Guli JIAPAER[1,3,4], YIN Hanmin[1,4], JIANG Liangliang[1,4], ZANG Xiaofang[1,5]

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. Agricultural Resources Regionalization and Remote Sensing Application Center of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830002, Xinjiang, China; 3. Research Center for Ecology and Environment of Central Asia, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 4. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 5. Xinjiang Academy of Environmental Protection Sciences, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: With 2300−3300 h of daylight per year, the percentage of daylight of Xinjiang is 60%−80%, ranking second in China. Its solar energy resources are higher than that of North China and Northeast China at the same latitude and also higher than that of the middle and lower reaches of the Yangtze River and South China at low latitude. Among them, southern Xinjiang is particularly rich in light and heat resources. However, solar radiation observation stations are sparse, resulting in the lack of total solar radiation data in Xinjiang. Furthermore, present knowledge of the regional distribution and available areas of solar energy resources is insufficient. The ITPCAS forcing datasets (reanalysis datasets) and monthly solar data of 30 meteorological observation stations were used in this study to analyze and evaluate the spatial and temporal features of total solar radiation and solar energy resources in southern Xinjiang from 1980 to 2015. The regionalization of solar energy resources utilization was further examined. We studied the temporal-spatial distribution of solar radiation using trend, *R*/*S* analysis, and wavelet analysis. The finding revealed that the total solar radiation in the southern Xinjiang region fluctuates once every 10−15 years with a clear interannual variation, exhibiting an overall increasing trend. Using the evaluation indexes of photothermal resources to assess the regional solar energy resources and their distribution characteristics, the results indicated that the solar resources in the southern Xinjiang region are more in the south and less in the north. At the same latitude, mountainous areas have more abundant solar energy resources than plains. Among them, the solar energy resources in the Kunlun Mountains region are most abundant and stable. Finally, combined with sand storm frequency, population abundance, and land transportation accessibility to establish an evaluation index system of solar energy resources utilization regionalization, the solar energy resources can be divided into three regions: The Aksu, Kashi, and Hotan Prefecture were identified as grade I available areas, characterized by abundant solar energy resources, high utilization, and moderately less dust strom weather, which are the best areas for comprehensive utilization of photoelectric and photobiological energy. Because of the high frequency of sand strom and poor accessibility of land transportation, the Tarim Basin and its marginal areas are identified as grade II available areas, where can be widely applied in an agricultural greenhouse, solar heating, etc. Ruoqiang and other areas are classified as grade III available areas, which are greatly affected by sand and dust weather and have poor conditions for the population and basic transportation facilities. Therefore, the construction of dispersed photovoltaic power stations and independent micronetworks can be highly promoted. These findings reveal that the solar energy resources in southern Xinjiang are extremely abundant, demonstrating a stable growth trend and high utilization value. This research analyzes the temporal-spatial distribution of solar radiation in southern Xinjiang, explains the spatial distribution pattern of solar energy resources, and identifies the solar resource utilization regionalization, which can provide theoretical support for the integration and engineering application of low-cost ecological utilization technology.

Key words: solar energy resources; spatial and temporal distribution characteristics; division research; southern Xinjiang